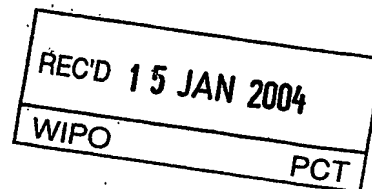


10/534850
PCT/EP 03/12896

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 102 53 821.2

Anmeldetag: 18. November 2002

Anmelder/Inhaber: rubitec Gesellschaft für Innovation und
Technologie der Ruhr-Universität Bochum mbH,
Bochum/DE

Bezeichnung: Messvorrichtung

IPC: G 01 K, G 02 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 27. November 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Stech

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

(07651.7)

Beschreibung

- 5 Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Messung physikalischer Größen, insbesondere zur Temperaturmessung.

10 Aus der DE 199 60 370 ist eine Temperatur-Meßvorrichtung mit einem optischen Resonator bekannt. Der optische Resonator ist als Mikropartikel ausgebildet, in den mittels zu dünnen Spitzen geformter Lichtwellenleiter das Licht einer breitbandigen Lichtquelle (Laserdiode) eingekoppelt und zur Auswertung mittels eines optischen Spektrometers Licht aus dem Mikropartikel ausgekoppelt wird. Innerhalb des kugelförmigen Mikro-
15 partikels kommt es aufgrund von Totalreflexion an der Oberfläche zu einer Vielfachreflexion mit Überlagerung der Wellenzüge, wobei bei bestimmten Lichtwellenlängen optische Resonanz (Überhöhung der elektromagnetischen Feldamplitude im Inneren des Mikropartikels) auftritt. Hierbei sind die Resonanzeigenschaften des optischen Resonators aufgrund der thermischen Ausdehnung sowie der Änderung des Brechungsindex von der Umgebungstemperatur abhängig. Das ausgekoppelte Licht wird mit einem
20 optischen Spektrometer beobachtet und das Resonanzspektrum in einen Temperaturwert umgerechnet.

25 Das in der DE 199 60 370 beschriebene Temperatur-Meßverfahren weist eine große Anzahl von Vorteilen auf. Aufgrund der geringen Größe des Resonators eignet es sich zur Temperaturmessung mit hoher räumlicher Auflösung. Aufgrund des rein optischen Meßverfahrens ist der Sensor auch in explosionsgefährdeter Umgebung sowie im Umfeld starker elektromagnetischer Felder einsetzbar (bspw. Kernspintomographie, Mikrowellenofen etc.).

30 Bei dem in der DE 199 60 370 beschriebenen Sensor erfolgt die Ein- und Auskopplung von Licht durch flexible optische Fasern, die zu Spitzen geformt sind, so daß sie sich auf wenige Mikrometer verjüngen. Diese Spitzen sind durch einen Photopolymer-Klebstoff mit dem Mikropartikel verbunden.

In der Praxis bietet dieser Aufbau einige Probleme. An den Photopolymer-Klebstoff werden erhebliche Anforderungen gestellt. Die Herstellung eines Sensors ist aufgrund der notwendigen exakten Positionierung und mechanischen Fixierung entsprechend aufwendig.

5

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, die vorgenannte Meßvorrichtung zu verbessern, und einen für verschiedene praktische Meßanwendungen geeigneten, mit geringem Aufwand herzustellenden Sensor vorzuschlagen.

10

Diese Aufgabe wird gelöst einerseits durch eine Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der der Resonator in einer am Lichtleiter gebildeten Aussparung angeordnet ist und andererseits durch eine Vorrichtung nach Anspruch 11, bei der der Resonator in einer keilförmigen Meßspitze zwischen zwei aufeinander zulaufenden Stegen angeordnet ist. Abhängige Ansprüche beziehen sich jeweils auf vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung.

15

Bei der Lösung gemäß Anspruch 1 ist am Lichtleiter eine Aussparung gebildet und der Resonator – zumindest zum Teil – innerhalb dieser Aussparung angeordnet. Der Resonator ist innerhalb der Aussparung mechanisch gehalten und optisch an den Lichtleiter angekoppelt. Der Resonator liegt direkt am Lichtleiter-Material an und wird dort durch Einklemmen und/oder durch die zwischen dem Resonator und dem Lichtleiter wirkenden Adhäsionskräfte gehalten. Bevorzugt ist der Resonator mehr als zur Hälfte, besonders bevorzugt sogar vollständig in der Aussparung aufgenommen. Lichtleiter weisen üblicherweise einen lichtleitenden Kern und einen daran angeordneten Mantel auf. Die Aussparung ist bevorzugt gebildet im Bereich des Kerns.

20

25

Diese Lösung hat den Vorteil, daß durch die mechanische Halterung des Resonator direkt am Lichtleiter kein Klebstoff mehr notwendig ist. Zudem ist es auch nicht mehr notwendig die Lichtleiter-Fasern zu dünnen Spitzen zu formen und am Resonator exakt zu positionieren. Sondern der Resonator ist in der Aussparung am Lichtleiter direkt gehalten und positioniert.

30

Der Resonator kann verschiedene Formen aufweisen, bei denen sich durch Totalreflexi-

on an der Grenzfläche eine Resonanz ausbilden kann. Außer der bevorzugten sphärischen Form kommen z.B. auch zylindrische oder ellipsoide Formen in Frage. Es ist von Vorteil, wenn die Form der Öffnung im Lichtleiter auf die Form des Resonator abgestimmt ist. Für Resonatoren mit runden Querschnitten empfiehlt sich eine kegel- oder zylinderförmige Aussparung. Die Aussparung ist bevorzugt in Längsrichtung des Lichtleiters ausgerichtet und bildet eine Öffnung zum freien Ende des Lichtleiters hin.

Die mechanische Fixierung des Resonators am Lichtleiter kann auf verschiedene Arten erfolgen. Bevorzugt wird, daß der Resonator von dem Lichtleiter an mindestens zwei im Abstand voneinander angeordneten Stellen berührt und dort klemmend gehalten wird. Besonders bevorzugt werden ringförmige Kontaktstellen, wie sie sich zwischen einem sphärischen oder ellipsoiden Resonatorkörper und einer zylinder- oder kegelförmigen Aussparung ergeben. Durch das Anliegen an mindestens zwei Stellen, die in ausreichendem Abstand angeordnet sind, ergibt sich einerseits eine vorteilhafte, weitgehend tangentielle optische Einkopplung und andererseits eine feste mechanische Halterung durch die sich zwischen den Kontaktstellen ergebenden Klemm- und Adhäsionskräfte.

Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist nur ein Lichtleiter vorhanden, mit dem sowohl Licht von der Lichtquelle zum Resonator als auch in entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung aus dem Resonator ausgekoppeltes Licht geführt wird. Diese Ausführung ist von erheblich einfacherem Aufbau als ein Sensor mit separatem Hin- und Rückleiter. Mittels eines Richtungskopplers in der Auswerteeinheit kann die Lichteinkopplung für die Anregung von der Lichtauskopplung für die Auswertung getrennt werden.

In einer bevorzugten Ausführungsform handelt es sich bei dem Lichtleiter um einen Hohlleiter. Der Resonator ist im Inneren des Hohlleiters angeordnet, wobei bevorzugt der Durchmesser des Resonators auf den Innendurchmesser des Hohlleiters abgestimmt ist, so daß sich ein guter optischer und mechanischer Kontakt zwischen dem Resonatorkörper und dem Hohlleiter ergibt. Der Innendurchmesser des Hohlleiters kann hierbei auch variieren, so daß sich bspw. eine Abstufung oder ein Übergangsbereich zwischen einem größeren Innendurchmesser nahe am freien Ende des Hohlleiters und einem kleineren Innendurchmesser in größerer Entfernung vom freien Ende ergibt.

Ist der Resonator im Übergangsbereich bzw. an der Stufe angeordnet, ergibt sich ein besonders guter mechanischer und optischer Kontakt zwischen Hohlleiter und Resonator und eine exakte Positionierung des Resonators.

- 5 Der Lichtleiter mit dem in der Aussparung angeordneten Resonator kann auf verschiedene Weise gestaltet sein. So ist es bspw. möglich, daß sich der Lichtleiter an seinem freien Ende verjüngt. Um eine größere mechanische Flexibilität des Lichtleiters zum Einklemmen des Resonators zu erreichen, kann der Lichtleiter im Bereich seines freien Endes einen oder mehrere Längsschlitze aufweisen. Schließlich kann das Ende des
10 Lichtleiters mit einer Kappe abgedeckt oder mit einer Vergußmasse verschlossen sein.

- Bei der Lösung gemäß Anspruch 11 wird eine keilförmige Meßspitze vorgeschlagen, wobei in einem vorderen Teil der Meßspitze der Resonator angeordnet ist und am hinteren Teil der Meßspitze zwei Lichtleiter-Fasern angekoppelt sind. Die Meßspitze weist zwei
15 einander gegenüber angeordnete, aufeinander zulaufende Stege auf, die mindestens zum Teil aus Lichtleiter-Material bestehen. Der Resonator ist zwischen den Stegen angeordnet.

- In einer bevorzugten Ausführungsform weist der hintere Teil der Meßspitze einen Sockel mit Öffnungen zur Aufnahme von zwei Lichtleitern auf, bevorzugt handelsüblichen Lichtleiter-Fasern mit einem Durchmesser von bspw. 80 bis 125 μm . Die Keilform der Meßspitze ermöglicht dann die optische Ankopplung dieser beiden Lichtleiter an den Resonatorkörper, der einen Durchmesser von üblicherweise weniger als 100 μm , typischerweise im Bereich von 50 μm aufweist.

- 25 Bevorzugt ist der Resonator zwischen den Stegen mechanisch gehalten. Hierbei kann der Resonator direkt an den Stegen anliegen und so durch Klemm- und Adhäsionskräfte mechanisch gehalten sein. Die optische Ankopplung erfolgt hierbei durch das Lichtleiter-Material der Stege. Es kann aber auch vorgesehen sein, daß geringfügige Spalte zwischen dem Resonator und den Stegen verbleiben, über die der Kopplungsgrad eingestellt werden kann. Die Spaltbreite liegt bspw. bei weniger als 1 μm , bevorzugt in der Größenordnung der verwendeten Lichtwellenlänge. In diesem Fall liegt der Resonator an einer Grund- und/oder Deckplatte an und ist dort durch Klemm- und/oder Adhäsions-
- 30

onskräfte gehalten. Grund- und/oder Eckplatte können zur Erhöhung der Flexibilität ein oder mehrere Längsschlitze aufweisen. Zur Verbesserung der Positionierung können Grund- und/oder Deckplatte auch eine in Längsrichtung verlaufende Führungsnut aufweisen, in der der Resonator aufgenommen ist.

5

Für die Meßvorrichtung, sowohl gemäß der Lösung nach Anspruch 1 als auch der Lösung nach Anspruch 11 sind eine Anzahl von Weiterbildungen möglich. So kann die Vorrichtung mehrere Resonatoren aufweisen. Diese können an denselben Lichtleitern bzw. an demselben Lichtleiter angekoppelt sein. Bspw. im Fall eines Hohlleiters können so
10 mehrere Resonatoren an verschiedenen Stellen innerhalb des Hohlleiter aufgenommen sein. Ebenso können bspw. innerhalb der keilförmigen Meßspitze mehrere Resonatoren unterschiedlicher Größe hintereinander jeweils zwischen den Stegen angeordnet sein. Mehrere Resonatoren können einerseits zu einer gleichzeitigen Messung an verschiedenen Orten dienen. Andererseits können verschiedene Resonatoren auch für die Mes-
15 sung in verschiedenen Meßbereichen verwendet werden, so daß eine höhere Genauigkeit im jeweiligen Meßbereich bzw. eine Erweiterung des Meßbereichs möglich ist.

Bei der Ankopplung mehrerer Lichtleiter an denselben oder dieselben Lichtleiter ist es für die Signalauswertung notwendig, die Signale der verschiedenen Resonatoren zu unterscheiden, um die jeweiligen Meßwerte zu ermitteln. Dies kann bspw. über die Auswertung von Laufzeitinformationen erfolgen. Bevorzugt wird aber, daß die verschiedenen Resonatoren bei verschiedenen Licht-Wellenlängen Resonanzen aufweisen und auf diese Weise bei der Signalauswertung unterschieden werden.
20

Für die eigentliche Durchführung der Messung kann bspw. einerseits eine breitbandige Lichtquelle mit einem kontinuierlichem Spektrum verwendet werden, dessen spektrale Breite bevorzugt mindestens dem freien Spektralbereich bzw. Modenabstand des Resonators entspricht. Die Auswertung erfolgt dann frequenzselektiv um die Lage der Resonanz zu ermitteln. Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung wird aber eine Lichtquelle
25 verwendet, die zur Erzeugung von Licht verschiedener Frequenzen angesteuert werden kann, bspw. eine durchstimbare Laserdiode. Bei Anregung des oder der Resonator/Resonatoren mit dem durchstimbaren Laser kann durch einfache Messung der Intensität des vom Resonator ausgekoppelten Lichts bei Anregung mit Licht der jeweili-
30

gen Frequenz die jeweilige Resonanzfrequenz des Resonators durch Ermittlung eines – mindestens lokalen – Intensitätsmaximums ermittelt werden. Aus der Lage der Resonanz kann dann auf den Meßwert für eine physikalische Größe (Temperatur) am Ort des jeweiligen Resonators geschlossen werden.

5

Nachfolgend werden Ausführungsformen der Erfindung anhand von Zeichnungen näher beschrieben. In den Zeichnungen zeigen:

- 10 Fig. 1 Einen Längsschnitt durch eine erste Ausführungsform eines Sensors mit kegelförmiger Bohrung in einer Lichtleiter-Faser;
- Fig. 2 einen Längsschnitt durch eine zweite Ausführungsform eines Sensors mit einer zylinder- und kegelförmigen Bohrung in einem Lichtleiter;
- Fig. 3 einen Längsschnitt durch eine dritte Ausführungsform eines Sensors mit einem Mikroresonator in einem Hohlleiter;
- 15 Fig. 4. einen Längsschnitt durch eine vierte Ausführungsform eines Sensors mit einem Mikroresonator in einem Hohlleiter mit gestuftem Innendurchmesser;
- Fig. 5 einen Längsschnitt durch eine fünfte Ausführungsform eines Sensors mit einem Hohlleiter mit Schlitz;
- 20 Fig. 6 einen Längsschnitt durch eine sechste Ausführungsform eines Sensors mit einem Hohlleiter mit gestuftem Innendurchmesser und Schlitz;
- Fig. 7 einen Längsschnitt durch eine siebte Ausführungsform eines Sensors mit am Ende verjüngtem Lichtleiter;
- Fig. 8 einen Längsschnitt durch eine achte Ausführungsform eines Sensors mit einer Kappe als Abdeckung;
- 25 Fig. 9 einen Längsschnitt durch eine neunte Ausführungsform eines Sensors mit einer Vergußmasse als Abdeckung;
- Fig. 10 einen Längsschnitt durch eine zehnte Ausführungsform eines Sensors mit mehreren Mikroresonatoren in einem Hohlleiter;
- 30 Fig. 11 einen Längsschnitt durch eine elfte Ausführungsform eines Sensors mit mehreren Mikroresonatoren unterschiedlichen Durchmessers;
- Fig. 12 einen Längsschnitt durch eine schematische Darstellung von Komponenten einer Meßvorrichtung mit einem Sensor nach Figur 1;

- Fig. 13 einen Längsschnitt durch eine zwölfte Ausführungsform eines Sensors in Form einer Meßspitze;
- Fig. 13a eine vergrößerte Ansicht des Bereichs A aus Figur 13;
- Fig. 13b eine Ansicht des Querschnittes entlang der Linie B .. B aus Figur 13a;
- 5 Fig. 14 eine stirnseitige Ansicht einer ersten Ausführungsform eines Sockels des Sensors aus Figur 13;
- Fig. 15 eine stirnseitige Ansicht einer zweiten Ausführungsform eines Sockels des Sensors aus Figur 13;
- 10 Fig. 16 einen Querschnitt durch die Spitze einer dreizehnten Ausführungsform eines Sensors;
- Fig. 17 einen Querschnitt durch die Spitze einer vierzehnten Ausführungsform eines Sensors;
- Fig. 18 einen Querschnitt durch die Spitze einer fünfzehnten Ausführungsform eines Sensors;
- 15 Fig. 19 eine schematische Darstellung von Komponenten einer zweiten Ausführungsform einer Meßvorrichtung mit dem Sensor aus Figur 13.

Figur 1 zeigt in einer Längsschnitt-Ansicht das Ende eines Lichtwellenleiters 10 mit einem daran angekoppelten, sphärischen optischen Resonator 12. Der an den Lichtwellen-Leiter angekoppelte Resonator 12 bildet einen Sensor, mit dem physikalische Größen, wie die Temperatur erfaßt werden können. Der Lichtleiter dient hierbei zur Verbindung des Sensors mit einer Ansteuerungs- und Auswerteeinheit, wie im Hinblick auf Figur 12 erläutert wird.

25 Bei dem Lichtleiter 10 handelt es sich um eine handelsübliche Lichtleiter-Faser, bspw. eine Multimodenfaser mit einem lichtleitenden Kern 14 und einem transparenten Mantel 16. Der Lichtleiter 10 ist von rundem Querschnitt. Er kann zusätzlich einen äußeren Schutzmantel (nicht dargestellt) als mechanischen Schutz aufweisen. Der Lichtleiter 10 kann einen beliebigen Durchmesser aufweisen. Im dargestellten Beispiel beträgt der Durchmesser des Kerns 14 ca. 100 µm.

30

Der optische Resonator 12 ist im dargestellten Beispiel als sphärischer Mikropartikel aus einem transparenten, homogenen Material hergestellt. Die optischen Resonatoren

können aber auch aus einem Kern und einer oder mehreren Schichten mit unterschiedlichem Brechungsindex bestehen. Der Kern kann hohl, evakuiert oder gasgefüllt sein. Er weist einen Durchmesser von im dargestellten Beispiel 60 µm auf.

5 Der Resonator 12 ist innerhalb einer kegelförmigen Aussparung 18 im lichtleitenden Kern 14 des Lichtleiters 10 angeordnet. Die kegelförmige Aussparung 18 bildet am freien Ende des Lichtleiters 10 eine runde Öffnung in der Stirnseite 20. Der Resonator 12 ist vollständig innerhalb der Aussparung 18 aufgenommen und liegt an den Kegelflächen an. Es bildet sich so eine im wesentlichen ringförmige Kontaktzone des Kerns 14 mit dem Resonator 12. Durch die Klemmwirkung aufgrund der Kegelform und durch Adhäsionskräfte, die zwischen dem Mikropartikel und dem umgebenden Kern 14 des Lichtleiters 10 wirksam sind und die bei derartig kleinen Körpern eine erhebliche Rolle spielen, ist der Resonator 12 in der Aussparung 18 mechanisch fixiert. Eine zusätzliche Fixierung, bspw. durch Klebstoff, ist nicht notwendig.

15 Die Aussparung 18 kann bspw. durch Beschuß mit Ionen oder durch Abschmelzen oder Abdampfen mit Laser erzeugt werden. Weiter kommt eine Herstellung der Aussparung durch thermoplastische Verformung oder mechanische Entfernung in Frage. Die Aussparung kann auch direkt bei der Herstellung der Glasfaser erzeugt werden.

20 Im dargestellten Beispiel beträgt der Öffnungswinkel des Kegels ca. 40°. Je geringer dieser Winkel gewählt wird, desto stärker ergibt sich eine Einklemm-Wirkung. Eine stärkere Einklemm-Wirkung wird bei kleineren Winkeln erzielt. Bevorzugt werden hierfür Öffnungswinkel von weniger als 30°, besonders bevorzugt sogar 15° oder weniger. Es ist aber zu beachten, daß im Bereich derartig kleiner Körper Adhäsionskräfte ebenfalls eine Rolle spielen.

25 Vom Winkel ist auch der Durchmesser des ringförmigen Bereichs abhängig, in dem der Resonator 12 mit dem Lichtleiter 10 in Kontakt steht. Es wird bevorzugt, daß dieser Durchmesser (d.h. der Abstand zweier gegenüberliegender Berührungsstellen) größer ist als der halbe Durchmesser des Resonators 12.

30 Der Resonator 12 kann dann von vorne in die Öffnung eingedrückt werden, bis er aus-

reichend fixiert ist.

Der Resonator 12 ist durch das Anliegen an dem Material des Kerns 14 mit dem Lichtleiter 10 auch optisch gekoppelt. Licht, das durch den Lichtleiter 10 geleitet wird, wird
5 im Bereich der Berührungsstellen in den Resonator 12 eingekoppelt. Die Geometrie bestimmt hierbei den Kopplungsgrad, wobei die Modenanpassung zu berücksichtigen ist. Ein hoher Kopplungsgrad ist zwar von Vorteil, aber keine zwingende Voraussetzung. Aufgrund der optischen Eigenschaften des Resonators 12 (Brechungsindex) kommt es zu einer vielfachen Totalreflexion an der Oberfläche und so zur Ausbildung eines Überlagerungsmusters. Bei phasenrichtiger Überlagerung der Wellenzüge kommt es zu einer
10 Überhöhung der elektromagnetischen Feldamplitude, bezeichnet als optische Resonanz. Wie in der DE 199 60 370 beschrieben, die hinsichtlich der Aussagen zur Herstellung, Form und Abmessung des Mikropartikels sowie bezüglich des verwendeten Meßprinzips hier vollständig einbezogen werden soll, kann dieser Effekt für die Temperaturmessung
15 ausgenutzt werden.

Eine entsprechende Meßvorrichtung 120 ist in symbolischer Form in Figur 12 dargestellt. Eine Lichtquelle 122 – im dargestellten Beispiel eine durchstimmbare Laserdiode – liefert Laserlicht einer bestimmten, einstellbaren Wellenlänge, das über einen Richtungskoppler 129 in den Lichtleiter 124 eingekoppelt wird und sich in diesem Lichtleiter
20 in einer ersten Ausbreitungsrichtung bis zu seiner Spitze 126 ausbreitet.

Die in Figur 12 dargestellte Spitze 126 des Lichtleiters weist einen Resonator auf und entspricht der ersten Ausführungsform eines Sensors (Figur 1). Das Licht wird in den
25 Resonator eingekoppelt. Der Lichtleiter 10 dient gleichzeitig auch zur Auskopplung von Licht aus dem optischen Resonator 12, das dann in entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung zu einer Auswerteeinheit 128 geleitet wird. Hierbei wird mit Hilfe des Richtungskopplers 129 sichergestellt, daß nur das im Lichtleiter 124 zurückgeleitete Licht auf die Auswerteeinheit 128 gelangt.

30

Die Messung kann nun wie in der DE 199 60 370 beschrieben erfolgen, indem von der Laserdiode 122 Licht einer gewissen Spektralbreite, die mindestens dem Modenabstand des Resonators entspricht, eingekoppelt und das ausgekoppelte Licht mittels eines fre-

quenzselektiven Auswertemittels wie eines optischen Spektrometers betrachtet wird.

Alternativ ist es auch möglich, eine durchstimmbare Laserdiode 122 zu verwenden. Die Messung erfolgt dann dadurch, daß die Frequenz des durchstimmbaren Lasers verändert wird und synchron dazu die Amplitude des aus der Faser in die Detektoreinheit 128 zurück transportierten Lichtes gemessen wird. Als Detektor wird vorzugsweise ein Halbleiterlichtdetektor (Fotodiode etc.) verwendet. Im Resonanzfall steigt die Amplitude des aus der Faser zurück in die Detektoreinheit gelangenden Lichtes stark an. Da die Frequenz des Lasers bekannt ist, bei der diese Resonanz gemessen wird, kann daraus die Temperatur bestimmt werden. Die Zuordnung von Resonanzfrequenz zum jeweiligen Temperatur-Meßwert erfolgt über eine analytische Betrachtung oder, bevorzugt, anhand einer vorherigen Kalibrierung.

Nachfolgend werden anhand der Figuren 2 bis 11 weitere, alternative Ausführungsformen eines Lichtleiters mit einem oder mehreren daran angekoppelten optischen Resonatoren zur Verwendung in einer Meßvorrichtung gemäß Figur 12 beschrieben. Hierbei ist der optische Resonator 12 jeweils als sphärischer Resonator dargestellt. Alternativ kann der Resonator 12 auch andere Formen, z.B. ellipsoide, annehmen, bei denen die Ausbildung optischer Resonanz möglich ist. Sämtliche der in den Figuren 1 bis 11 dargestellten Ausführungsformen verwenden nur einen Lichtleiter sowohl zur Ein- als auch zur Auskopplung von Licht in den bzw. aus dem optischen Resonator.

Bei der zweiten Ausführungsform gemäß Figur 2 wird dieselbe Multimodenfaser 10 wie in Figur 1 verwendet. Der Resonator 12 weist hier einen etwas größeren Durchmesser von ca. 90 µm auf. Der Lichtleiter 10a weist eine Aussparung 18a mit einem im vorderen Bereich zylindrischen Abschnitt und im hinteren Bereich kegelförmigen Abschnitt auf.

Die erste und die zweite Ausführungsform stimmen darin überein, daß eine gute Kopplung zwischen der Lichtleiter-Faser und dem optischen Resonator auf einer ringförmigen Fläche erfolgt. In die kegelförmige Aussparung 18 bzw. den hinteren, kegelförmigen Bereich der Aussparung 18a können Mikroresonatoren unterschiedlicher Größe eingesetzt werden, die dann stets in Kontakt mit der Kegelfläche sind. Ist die Aussparung ganz (nicht gezeigt) oder teilweise zylinderförmig (wie in Figur 2), kann durch Verwen-

dung eines Resonators passender Größe ein gewünschter Abstand zwischen dem lichtleitenden Kern 14 und dem Mikroresonator eingehalten werden.

5 In den Figuren 3 bis 9 sind Sensoren mit Kopplung jeweils eines Resonators 12 mit optischen Hohlleitern gezeigt. Die Hohlleiter weisen runden Querschnitt auf. Die Lichtleitung erfolgt innerhalb eines röhrenförmigen Lichtleiters. Um den Lichtleiter ist ein transparenter Mantel angeordnet sowie ggfs. eine weitere, mechanische Schutzhülle, die hier nicht dargestellt sind. Optische Hohlleiter sind mit Innendurchmessern von 50 bis 250 μm handelsüblich.

10

Bei dem in Figur 3 dargestellten Sensor 30 ist der kugelförmige Mikroresonator 12 in den Innenraum eines Hohlleiters 34 eingeschoben. Der Resonator 12 ist klemmend im Inneren des Lichtleiters 34 aufgenommen und steht über eine ringförmige Mantellinie in Kontakt mit dem Lichtleiter-Material 32. Besonders bei klemmender Aufnahme eines Resonators in einem Hohlleiter ist die Verwendung eines ellipsoiden Resonators (nicht dargestellt) vorteilhaft. Hier kann die Ausdehnung in Längsrichtung des Hohlleiters größer sein als in Querschnittsrichtung. Eine Veränderung der Abmessungen des Resonators kann dann bspw. vor allem die Längsachse betreffen, so daß die Kontaktlinie und die klemmende Aufnahme zwischen Hohlleiter und Resonator weitgehend unverändert bleibt.

20

Der Sensor 30 kann durch Einschieben des auf den Innendurchmesser des Lichtleiters 34 abgestimmten Resonators von der vorderen Öffnung her hergestellt werden. Der Resonator 12 ist vollständig im Innenraum aufgenommen. Optische Ein- und Auskopplung erfolgt entlang der gesamten Kontaktlinie. Bei der in Figur 3 gezeigten Ausführungsform, bei der der Durchmesser des Resonators 12 im wesentlichen mit dem Innendurchmesser des Lichtleiters 34 übereinstimmt, kommt es zu einer exakt tangentialen Lichteinkopplung.

25

30 Bei der in Figur 4 gezeigten vierten Ausführungsform handelt es sich wie in Figur 3 um die Kopplung eines Resonators 12 an einen Hohlleiter 44. Der Hohlleiter 44 zeigt in diesem Fall einen stufenförmigen Ansatz 46. Dieser Ansatz 46 kann als echte Stufe (nicht dargestellt) oder, wie in Figur 4 gezeigt, als Teil einer Kegelfläche ausgebildet

sein. Durch den stufenförmigen Ansatz ist die axiale Position des Resonators 12 festgelegt und gleichzeitig eine automatische Zentrierung erreicht. Die Einkopplung kann über den Ansatz 46 oder über den dünnen zylindrischen Teil des Hohlleiters 44 erfolgen. Damit ergibt sich eine hohe Flexibilität in der Anpassung der Hohlleitermoden und der Resonatormoden.

Die fünfte und sechste Ausführungsform gemäß Figur 5 und Figur 6 entspricht jeweils der dritten und vierten Ausführungsform mit dem Unterschied, daß am Ende des jeweiligen Hohlleiters ein Längsschlitz 52, 62 vorgesehen ist. Auf diese Weise wird die Elastizität des Hohlleiters an der Spitze erhöht, so daß eine Anpassung des Durchmessers an den Resonatoraußendurchmesser beim Eindrücken möglich ist. Die dann entstehenden elastischen Kräfte sorgen gleichzeitig für eine Fixierung des Resonators 12 im Bereich der Spitze.

In Figur 7 ist ein Sensor 70 dargestellt, bei dem sich der lichtführende Mantel 72 des Hohlleiters zur Spitze in einem Bereich 74 verjüngt. Durch diese Verjüngung wird eine bessere räumliche Überlagerung der Resonatormoden mit den Hohlleitermoden sichergestellt.

In den Figuren 8 und 9 sind eine achte und eine neunte Ausführungsform 80, 90 von Sensoren dargestellt. Es handelt sich um Hohlleiter mit daran angekoppeltem Resonatorkörper. Bei der achten Ausführungsform wird zur Isolation eine Kappe 82 auf den Hohlleiter geschoben und dort in geeigneter Weise fixiert. Bei der neunten Ausführungsform wird der Hohlleiter mit dem eingebrachten Mikroresonator mit einer Vergußmasse 92 vergossen. Dieser Verschluß kann mit einem aushärtenden Kleber oder Kunststoff oder sonstigen Materialien erfolgen.

Die jeweiligen Merkmale der verschiedenen vorgenannten Ausführungsformen (Längsbohrung bzw. Hohlleiter, Zylinder- bzw. Kegelform, Schlitz, Abstufung, Verjüngung, Kappe, Vergießen) können selbstverständlich für eine konkrete Anwendung beliebig kombiniert werden. Insofern sind die in den Figuren 1 bis 9 gezeigten Sensoren lediglich als beispielhafte Kombinationen dieser Merkmale anzusehen.

Die Figuren 10 und 11 zeigen eine zehnte und eine elfte Ausführungsform 100, 110 von Sensoren. Bei den Sensoren 110 sind mehrere Resonatoren 12a, 12b, 12c, 12d, 12e vorgesehen, von denen jeweils mehrere an denselben Lichtleiter angekoppelt sind.

5 Bei der zehnten Ausführungsform sind analog zur Aufnahme eines Resonators bei der dritten Ausführungsform in einem Hohlleiter 102 mehrere im Abstand angeordnete Resonatoren 12a, 12b, 12c vorgesehen, von denen hier drei dargestellt sind. Diese sind mit Distanzstücken 104a, 104b, 104c auf einer bestimmten Entfernung voneinander gehalten. Alternativ können sie auch durch Reibungs- und/oder Adhäsionskräfte an
10 dem jeweiligen Ort fixiert sein. Die Resonatoren 12a, 12b, 12c sind entsprechend der Kopplung beim dritten Ausführungsbeispiel gemeinsam an den Lichtleiter 102 angekoppelt.

Im dargestellten Beispiel sind die Resonatoren 12a, 12b, 12c so ausgeführt, daß sie bei
15 unterschiedlichen Frequenzen des eingekoppelten Lichts in Resonanz geraten. Dies kann durch Verwendung von Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex erreicht werden oder durch ellipsoide Resonatoren (nicht dargestellt), bei denen eine Achse dem Innendurchmesser des Lichtleiters 102 entspricht und die andere in Längsrichtung verlaufende Achse unterschiedlich groß ist, so daß die jeweils gewünschten, von-
20 einander abweichenden Resonanzfrequenzen entstehen.

Figur 11 zeigt den Sensor 110 gemäß der elften Ausführungsform, bei dem unterschiedlich große Resonatoren 12d, 12e an denselben, im vorliegenden Beispiel mehrfach gestuften Hohlleiter 112 angekoppelt sind. Die Resonatoren 12d, 12e weisen unterschiedliche Resonanzfrequenzen auf. Sie können aus demselben Material bestehen.
25

Die Verwendung von mehreren Resonatoren beim zehnten und elften Ausführungsbeispiel kann verschiedene Vorteile haben. Einerseits kann so bei einmaligem Positionieren des Sensors 100 die Temperatur an verschiedenen Orten, nämlich im Bereich der
30 jeweiligen Resonatoren 12a, 12b, 12c gemessen werden. Zum anderen kann mit einem Sensor, der über unterschiedliche Resonatoren verfügt, der Temperatur-Meßbereich erweitert bzw. die Genauigkeit der Messung erhöht werden. Dies kann bspw. das Resonator-Material betreffen. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Polymeren

und Glas bspw. unterschieden sich um eine Größenordnung. Bei gleichzeitiger Verwendung von Resonatoren beider Materialien kann bspw. durch einen Glas-Resonator ein breiter Meßbereich erreicht werden, aber innerhalb eines bestimmten Bereichs davon eine hohe Genauigkeit durch einen geeigneten Polymer-Resonator erzielt werden.

5

In Figur 13 ist eine zwölfte Ausführungsform 130 eines Sensors gezeigt. Es handelt sich um eine Vorrichtung zur Kopplung eines optischen Mikroresonators 12 mit zwei handelsüblichen Lichtleiter-Fasern.

10 Der gesamte Meßaufbau ist in Figur 19 dargestellt. Auch hier wird wie in der DE 199 60 370 beschrieben eine physikalische Größe am Ort des Resonators – hier die Temperatur - gemessen, indem das Licht einer Laserdiode 192 über einen ersten Lichtleiter 194 zum Sensor 130 geleitet und dort in einen Mikroresonator eingekoppelt wird. Das aus dem Mikroresonator ausgekoppelte Licht wird über einen zweiten Lichtleiter 195 zur Meß-
15 vorrichtung zurückgeleitet und auf eine Auswerteeinheit 198 gegeben. Die Auswertung erfolgt wie vorstehend im Hinblick auf Figur 12 erläutert. Die Meßvorrichtung 190 unterscheidet sich von der Meßvorrichtung 120 aus Figur 12 dadurch, daß zur Ankopplung des Sensors 130 an die Meßvorrichtung zwei Lichtleiter verwendet werden.

20 Der in Figur 13 dargestellte Sensor 130 weist einen Sockel 131 und eine keilförmige Meßspitze 132 auf. Die Meßspitze 132 ist gebildet durch zwei Stege 133a, 133b, die zur Spitze hin aufeinander zulaufen. Im in Figur 13a vergrößert dargestellten Bereich des Endes der Meßspitze 132 ist der optische Resonator 12 zwischen den Stegen 133a, 133b angeordnet, wobei er beidseitig an den Stegen anliegt und durch Klemm- und Adhäsionskräfte dort gehalten ist.
25

Wie im Querschnitt von Figur 13b erkennbar ist, weisen die Stege 133a, 133b Streifen 134a, 134b aus Lichtleiter-Material auf. Die Streifen 134a, 134b verlaufen mittig auf der Innenseite entlang der gesamten Länge der Stege 133a, 133b. Sie liegen wie in Figur 13b
30 gezeigt am Resonator 12 tangential an.

Wie weiter aus Figur 13b ersichtlich, weist die Meßspitze 132 weiter eine Grundplatte 135 und eine Deckplatte 136 auf, die den Bereich zwischen den Stegen 133a, 133b nach

oben und unten abschließen. Die Grundplatte 135a weist hierbei im Bereich des Endes der Spitze zwei Schlitze 136 auf. So wird die Elastizität der Seitenstege erhöht und diese können auseinanderfedern, um den Mikroresonator zwischen sich aufzunehmen. Durch die elastischen Kräfte wird eine gute Fixierung des Resonators 12 erzielt.

5

Die keilförmige Ausführung des Sensors 130 erlaubt den Übergang von der Größe der optischen Resonatoren, deren Abmessung typischerweise in der Größenordnung von weniger als 100 µm liegen, auf den Abstand zweier nebeneinanderliegender handelsüblicher Glasfasern, deren Kernabstand in der Größenordnung von einem halben Millimeter liegt. Der Keilwinkel ist so gewählt, daß der Resonator 12 zwischen den Seitenstegen 133a, 133b eingedrückt und dort durch Reibungs- und Adhäsionskräfte fixiert werden kann. Durch die keilförmige Ausführung ist es möglich, verschiedene Resonatorgrößen zu verwenden. Ggfs. können auch mehrere Resonatoren unterschiedlichen Durchmessers an unterschiedlichen Stellen zwischen den Stegen 133a, 133b angeordnet werden.

10

15

Die Meßspitze 132 kann bspw. mit Hilfe von Verfahren hergestellt werden, wie sie bei der Herstellung von integrierten Schaltungen verwendet werden.

Der Sockel 131 dient zum Anschluß der Lichtleiter. Hier sind verschiedene Ausführungen möglich. Figur 14 zeigt den Sockel 133 in einer stirnseitigen Ansicht mit zwei Öffnungen 142a, 142b zum Einstecken herkömmlicher Lichtleiter-Fasern. Die Löcher 142a, 142b sind in den quaderförmigen Sockel 131 gebohrt. Die Lichtleiter-Streifen 134a, 134b sind durch Kanäle 144a, 144b bis zu den Einstecklöchern 142a, 142b geführt, so daß in die Öffnungen 142a, 142b eingesteckte Lichtleiter-Fasern optisch daran angekoppelt sind.

20

25

Figur 15 zeigt eine alternative Ausführungsform eines Sockels 150 der anstatt des Sockels 131 verwendet werden kann. Der Sockel 150 ist als Schlitzsockel ausgeführt. Die Lichtleiter-Fasern werden in Schlitze 152a, 152b eingedrückt und dort geeignet fixiert, bspw. eingegossen oder eingeklebt.

30

In den Figuren 16 bis 18 sind die dreizehnte, vierzehnte und fünfzehnte Ausführungs-

form eines Sensors dargestellt. Gezeigt sind jeweils Querschnitts-Darstellungen im Bereich des Resonators 12. Die jeweiligen Sensoren entsprechen vom Aufbau her der keilförmigen Meßspitze 130 mit Sockel 131 aus Figur 13.

- 5 Die dreizehnte Ausführungsform (Figur 16) entspricht dem in Figur 13b gezeigten Sensor mit Stegen 133a, 133b, Deckplatte 136 und Bodenplatte 135. Hier allerdings liegt der Resonator 12 nicht direkt an den Stegen 133a, 133b an, sondern in der Bodenplatte 135 ist eine Führungsnut 116 gebildet. Zur Zentrierung des Mikroresonators, der in die Führungsnut 160 eingelegt wird. Zwischen den Lichtleitern 134a, 134b in den Stegen 133a, 133b und dem Resonator 12 besteht ein geringfügiger Abstand. Über den Abstand kann der Kopplungsgrad zwischen den Lichtleitern 134a, 134b und dem Resonator 12 beeinflusst werden.

- 15 Bei der vierzehnten Ausführungsform (Figur 17) bestehen sowohl die Stege 133a, 133b als auch die Grundplatte 135 vollständig aus Lichtleiter-Material, was die Herstellung wesentlich erleichtert. Auch hier sind die Stege im Bereich des Sockels jeweils an einzelne Lichtleiter-Fasern zur Ein- bzw. Auskopplung von Licht angeschlossen. Aufgrund der durchgängigen, lichtleitenden Grundplatte 135 kommt es zwar in geringem Maße zu Übersprechen zwischen Hin- und Rückleiter. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse ist dieser Effekt aber begrenzt.

Auch hier besitzt die Grundplatte 135 eine mittlere Vertiefung zur Zentrierung des Resonators 12, die ggfs. auch entfallen kann.

- 25 Alternativ zur Ausführung der Stege wie in Figur 13b gezeigt mit Streifen 134a, 134b aus Lichtleiter-Material können die Stege 133a, 133b wie bei der fünfzehnten Ausführungsform (Figur 18) gezeigt, auch vollständig aus Lichtleiter-Material bestehen. Dies kann kombiniert werden bspw. mit der Einklemmung des Resonators 12 zwischen den Stegen, wobei Schlitze 138 in Grund- oder Deckplatte vorteilhaft sind. Alternativ kann auch, wie in Figur 18 dargestellt, eine Zentrierung des Resonators 12 zwischen den Stegen 133a, 133b in einer Führungsnut 180 erfolgen, wobei es dann möglich ist, einen gewissen Abstand zwischen den vollständig aus Lichtleiter-Material bestehenden Stegen 133a, 133b und dem Mikroresonator 12 vorzusehen.

(07651.7)

Ansprüche

5

1. Vorrichtung zur Messung physikalischer Größen mit
 - einer Lichtquelle (122) und einem Lichtleiter (124), um das Licht der Lichtquelle (122) in einen als Mikropartikel ausgebildeten optischen Resonator (12) einzukoppeln,
 - und Mitteln (128) zur Beobachtung von aus dem Resonator (12) ausgekoppelten Licht,

10

dadurch gekennzeichnet, daß

15

- der Resonator (12) in einer am Lichtleiter (124) gebildeten Aussparung (18) mindestens teilweise aufgenommen und dort mechanisch gehalten und optisch an den Lichtleiter (124) angekoppelt ist.

20

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei der
 - die Aussparung (18) an einem freien Ende des Lichtleiters gebildet ist und eine Öffnung zur Stirnseite des Lichtleiters aufweist.

25

3. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
 - nur ein Lichtleiter (124) vorhanden ist,
 - wobei sich in dem Lichtleiter (124) das Licht von der Lichtquelle (122) zum Resonator (12) in einer ersten Ausbreitungsrichtung ausbreitet, und vom Resonator (12) in einer zweiten, entgegengesetzten Ausbreitungsrichtung.

30

4. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
 - der Resonator (12) von dem Lichtleiter durch Anliegen an mindestens zwei im Abstand voneinander angeordneten Stellen klemmend gehalten ist.

5. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
 - der Lichtleiter sich an seinem freien Ende verjüngt.
- 5 6. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
 - der Lichtleiter ein Hohlleiter ist.
- 10 7. Vorrichtung nach Anspruch 7, bei der
 - der Hohlleiter an mindestens einer ersten, nahe dem freien Ende angeordneten Stelle einen größeren Innendurchmesser aufweist als an einer zweiten, weiter von dem freien Ende entfernten Stelle.
- 15 8. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
 - der Lichtleiter an seinem freien Ende mit einer Kappe (82) abgedeckt ist.
- 20 9. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
 - der Lichtleiter an seinem freien Ende mit einer Vergußmasse (92) verschlossen ist.
- 25 10. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
 - der Lichtleiter an seinem Ende mindestens einen Längsschlitz (52, 62) aufweist.
- 30 11. Vorrichtung zur Messung physikalischer Größen mit
 - einer Lichtquelle (192) und einem oder mehreren Lichtleitern (194, 195) um Licht der Lichtquelle (192) in einen als Mikropartikel ausgebildeten Resonator (12) einzukoppeln,
 - und Mitteln (198) zur Beobachtung von aus dem Resonator (12) ausgekoppeltem Licht,

gekennzeichnet durch

 - eine keilförmige Meßspitze (132) mit zwei aufeinander zulaufenden Stegen (134a, 134b), zwischen denen in einem vorderen Teil der Meßspitze (132) der

Resonator (12) angeordnet ist,

- wobei die Stege (133a, 133b) aus Lichtleiter-Material bestehen oder einen Teil aus Lichtleiter-Material aufweisen und an einem hinteren Ende der Meßspitze (132) an zwei mit der Lichtquelle (122) bzw. mit den Auswertemitteln (198) verbundene Lichtleiter-Fasern (194, 195) angekoppelt sind.

5

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, bei der

- der hintere Teil der Meßspitze einen Sockel (131, 150) mit Öffnungen (144a, 144b, 152a, 152b) zur Aufnahme von zwei Lichtleiter-Fasern (194, 195) aufweist,
- wobei in den Öffnungen (142a, 142b, 152a, 152b) aufgenommene Lichtleiter-Fasern mit dem Lichtleiter-Material (134a, 134b) der Stege (133a, 133b) optisch gekoppelt sind.

10

15 13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, bei der

- eine Grundplatte (135) und/oder eine Deckplatte (136) vorgesehen sind.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, bei der

- Deckplatte (136) und/oder Grundplatte (135) mindestens im vorderen Teil einen oder mehrere Längsschlitze (138) aufweisen.

20

15. Vorrichtung nach Anspruch 13 oder 14, bei der

- Deckplatte (136) und/oder Grundplatte (135) mindestens im vorderen Teil eine in Längsrichtung verlaufende Führungsnut (160, 180) aufweisen.

25

16. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- mehrere Resonatoren (12a, 12b, 12c, 12d, 12e) vorhanden sind,
- wobei die Resonatoren (12a, 12b, 12c, 12d, 12e) an denselben Lichtleiter (102, 112) oder dieselben Lichtleiter angekoppelt sind.

30

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, bei der

- die Resonatoren (12a, 12b, 12c, 12d, 12e) so ausgebildet sind, daß ihre jeweilige optische Resonanz bei Anregung mit Licht verschiedener Frequenz auftritt.

18. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
- der oder die Resonatoren (12a, 12b, 12c, 12d, 12e) sphärisch oder als Ellipsoide ausgebildet sind.

5

19. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der
- die Lichtquelle (122) zur Erzeugung von Licht verschiedener Wellenlängen ansteuerbar ist,
 - und die Beobachtungsmittel (128) die Intensität des aus dem Resonator (12) ausgekoppeltes Lichts messen.

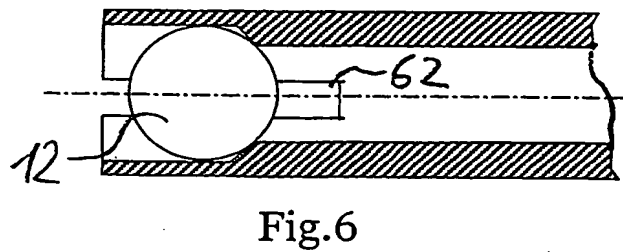
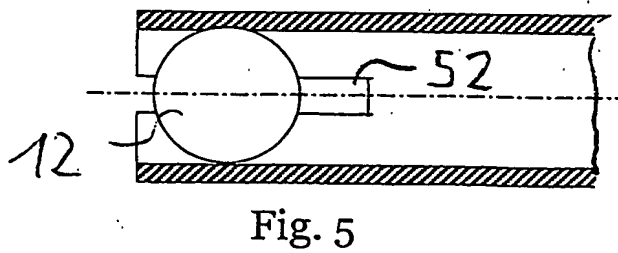
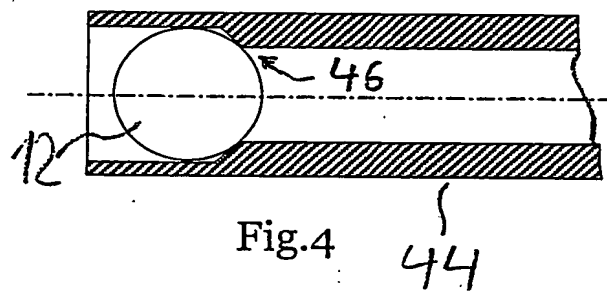
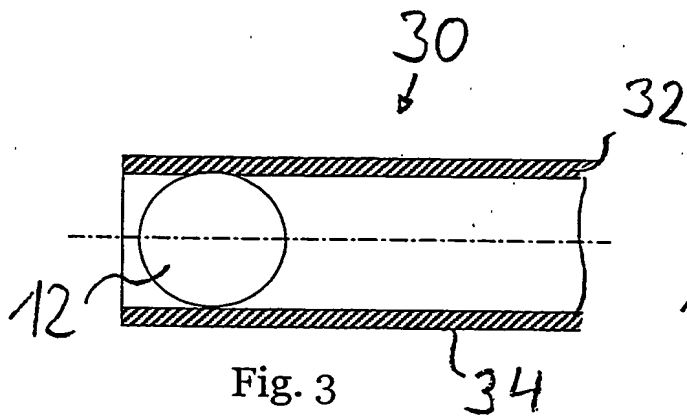
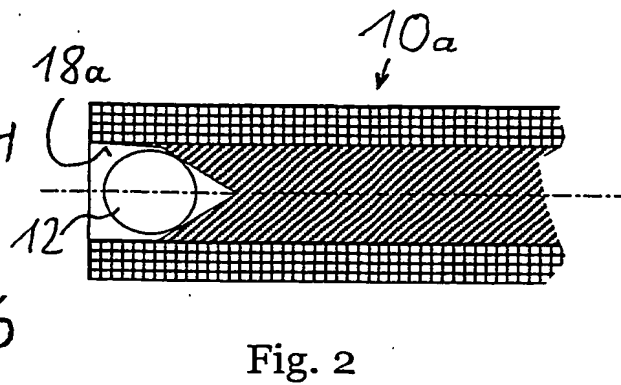
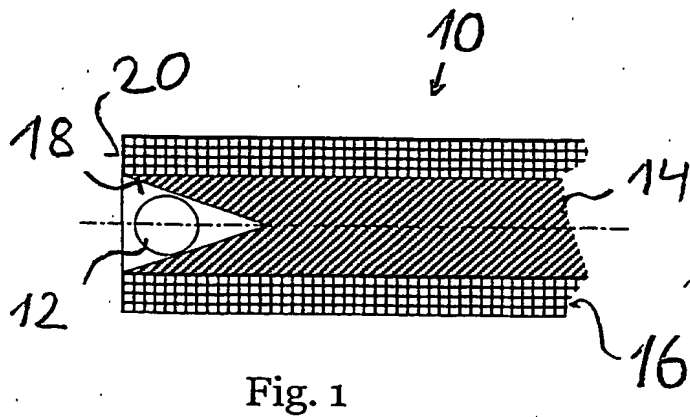
10

(07651.7)

Zusammenfassung

Eine Vorrichtung zur Messung physikalischer Größen, insbesondere zur Temperaturmessung, wird vorgeschlagen, bei der mit einem oder mehreren Lichtwellenleitern Licht einer Lichtquelle in einen als Mikropartikel ausgebildeten optischen Resonatoren eingekoppelt und aus diesem wieder ausgekoppelt wird. Um eine möglichst gute optische und mechanische Ankopplung des Resonators an einen Lichtwellenleiter zu erreichen, wird der Resonator in einer am Lichtleiter gebildeten Aussparung angeordnet und dort mechanisch gehalten und optisch an den Lichtleiter angekoppelt. Alternativ wird eine keilförmige Meßspitze mit zwei aufeinander zulaufenden Stegen vorgeschlagen, zwischen denen in einem vorderen Teil der Meßspitze der Resonator angeordnet ist, wobei die Stege aus Lichtleiter-Material bestehen oder einen Teil aus Lichtleiter-Material aufweisen und an mindestens eine mit der Lichtquelle verbundene Lichtleiter-Faser angekoppelt sind.

(Figur 12)



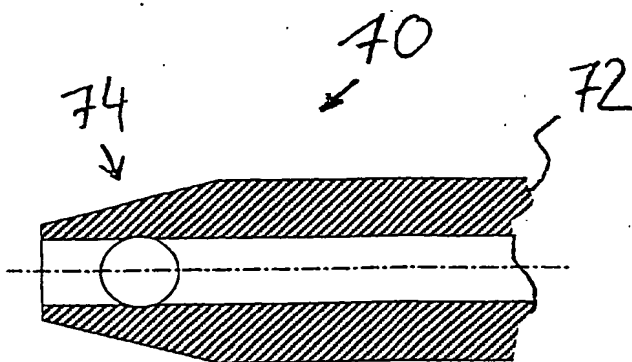


Fig. 7

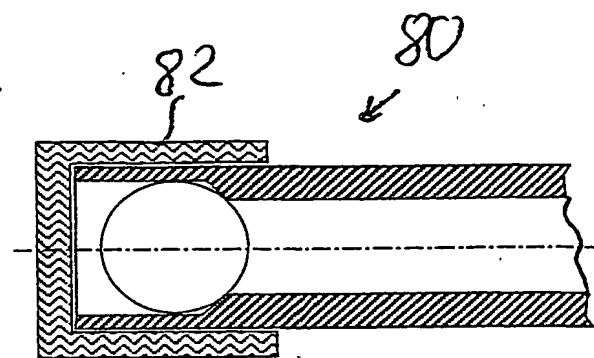


Fig. 8

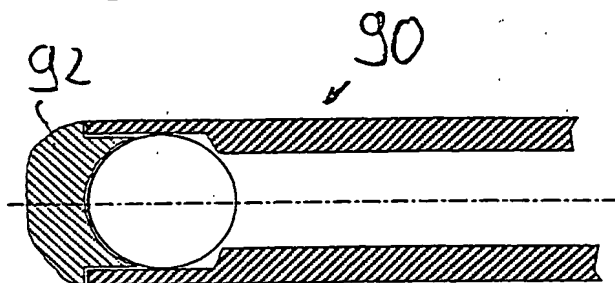


Fig. 9

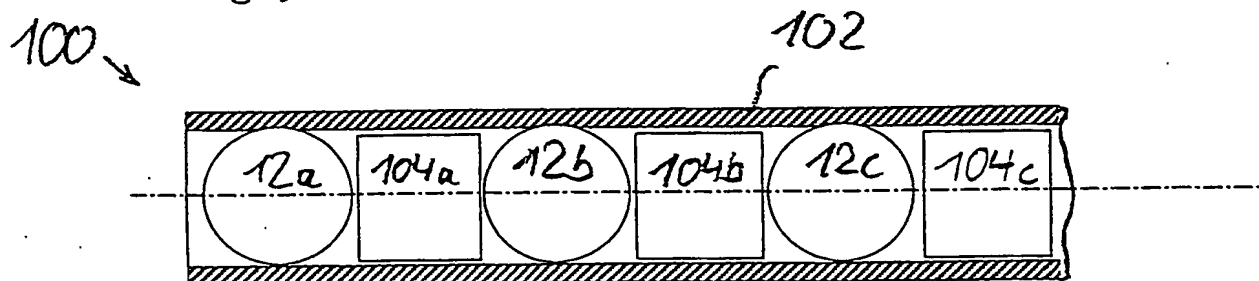


Fig. 10

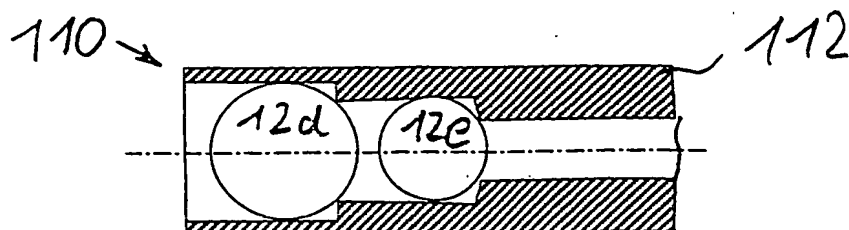
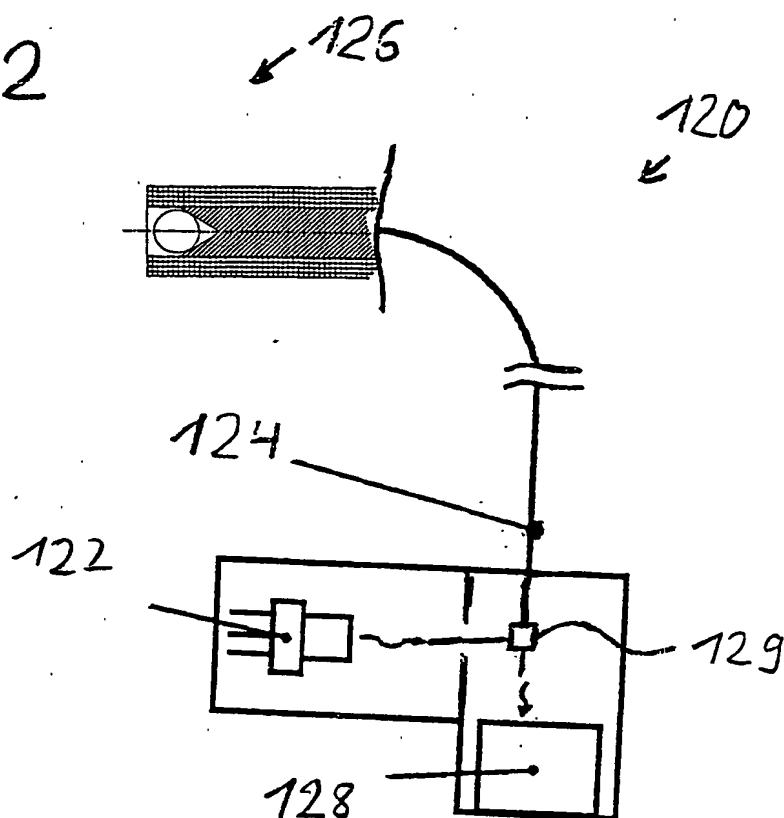
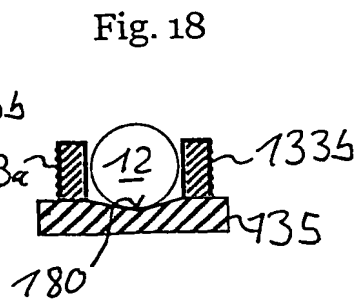
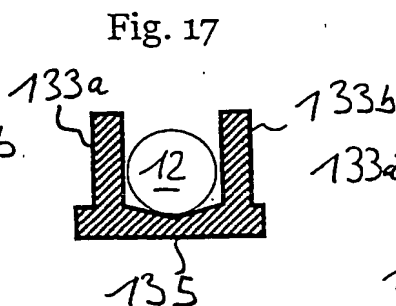
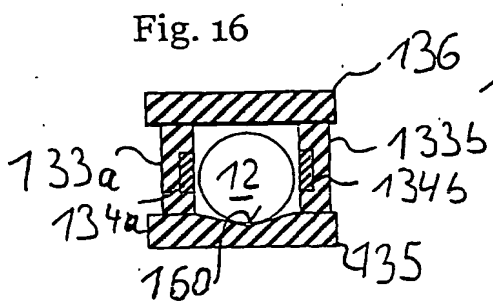
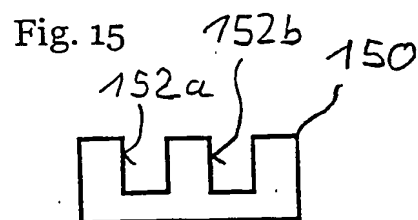
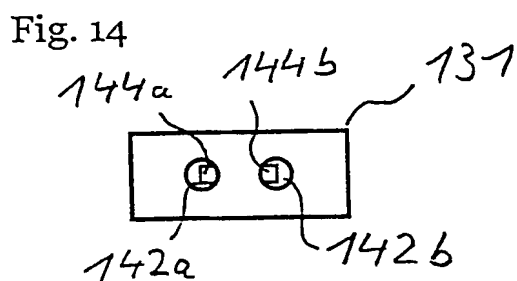
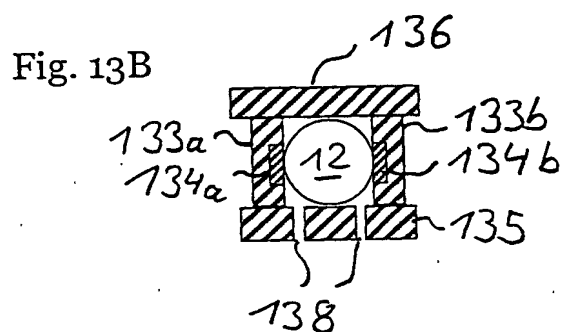
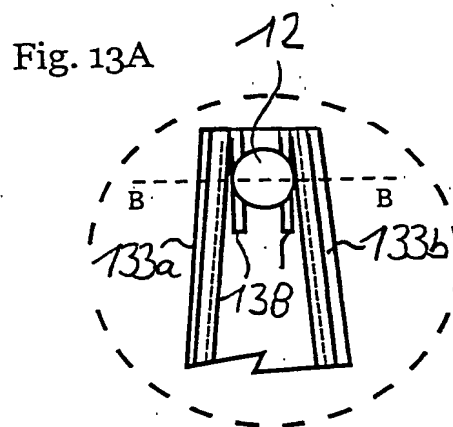
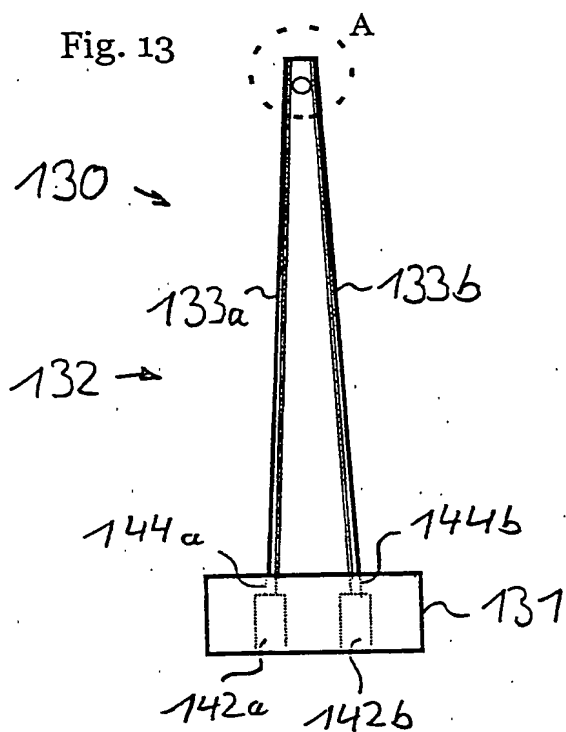


Fig. 11

Fig. 12





BEST AVAILABLE COPY

Fig. 19

